Aus dem Tropenmedizinischen Institut der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. H. J. Knüttgen

Beziehung zwischen Verdunstung und Schweißmenge bei Hitzearbeit

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

dem Fachbereich Theoretische Medizin
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Georg Balg
aus Köln

1970

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547603_0135

Aus dem Tropenmedizinischen Institut der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. H. J. Knüttgen

Beziehung zwischen Verdunstung und Schweißmenge bei Hitzearbeit

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

dem Fachbereich Theoretische Medizin
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Georg Balg
aus Köln

1970

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. H.J. Knüttgen

1. Berichterstatter: Professor Dr. W. Höfler
2. Berichterstatter: Professor Dr. H.J. Knüttgen

FOTODRUCK PRÄZIS Barbara v. Spangenberg KG • Tübingen

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 1

Methodik 2

Berechnungen und Messungen 5

Ergebnisse 7

Diskussion 20

Kurze Zusammenfassung 23

Literaturverzeichnis 24

Anhang 26

Einleitung

Die schon von vielen Autoren untersuchten Phänomene der Hitzeakklimatisation des Menschen schützen den Organismus vor einer gefährlichen Wärmestauung. Als wertvolles Hilfsmittel für derartige Untersuchungen erwies sich die Klimakammer, die es erlaubt, definierte und leicht kontrollierbare klimatische Bedingungen nach Wahl zu schaffen.

Theoretisch stehen dem Organismus drei Wege der Wärmeabgabe zur Verfügung: Schweiß-Verdunstung, Konvektion und Strahlung. Es zeigte sich (Höfler, 1968), daß die durch eine gesteigerte Schweißproduktion ermöglichte Zunahme der Verdunstung auf der Körperoberfläche der wesentlichste Hitzeakklimatisationserfolg ist, durch den der Körper erhebliche Wärmemengen abgeben kann; die beiden anderen Wege, Strahlung und Konvektion, führen dem Körper unter Hitzebedingungen sogar noch Wärme zu. Bedeutungsvoll ist wohl auch die Beobachtung, daß die Kerntemperatur des Hitzeakklimatisierten durchschnittlich etwa 1°C tiefer liegt, als die des Unakklimatisierten (Höfler, 1966; Schmoll, 1966), wodurch ein größerer Sicherheitsabstand zur kritischen oberen Temperaturgrenze des Körpers geschaffen ist.

Auf weitere gesicherte Anpassungserscheinungen, wie Verringerung des NaCl-Gehaltes von Schweiß und Urin (Höfler, 1968), veränderte Schweißproduktionsverteilung auf der Körperoberfläche (Höfler, 1968), die ebenfalls zu einer Stabilisierung des Stoffwechselgleichgewichtes beitragen, sei nur hingewiesen, da sie nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Thema dieser Arbeit stehen.

Im Zusammenhang mit noch ungelösten Problemen der Hitzeakklimatisation steht eine Frage Lehmanns (Lehmann, 1965), der auf die Tatsache hinwies, daß sowohl der Unakklimatisierte, als erst recht der zu größeren Schweißproduktionen fähige Akklimatisierte, im feucht-heißen Klima mehr Schweiß pro Zeiteinheit produzieren, als sie im selben Zeitraum

maximal verdunsten können, so daß ein Teil des Schweißes anscheinend nutzlos abtropft. Mit anderen Worten: bei beiden ist der Quotient aus Schweißmengen S und Verdunstungskapazität C größer als 1,o, also $\frac{S}{C} > 1,o$.

Höfler griff die Frage nach dem Sinn dieser Überschußproduktion auf (Höfler, Ladipoh u.Laaser, 1969), indem er die Übertragbarkeit der Kerslake'schen Modellversuche (Kerslake, 1963) auf den Menschen in einem Klimakammerversuch überprüfte.

Kerslake fand (Kerslake, 1963), daß im Luftstrom rotierende Zylinder, deren Oberfläche verschieden stark benetzt wurden, erst dann die maximal mögliche Verdunstung zeigten, wenn der Quotient aus auf die Oberfläche gebrachter Wassermenge S und im entsprechenden Zeitraum verdunsteter Menge V 2,o oder größer war. Eine Erklärung dieser Beobachtung war darin zu sehen, daß schon von einem Quotientenwert $\frac{S}{C} = o,4$ an Wasser abzutropfen begann, als also noch keine vollständige Benetzung und damit maximal mögliche Verdunstung erreicht war.

Der erste Versuch Höflers (Höfler, Ladipoh u.Laaser, 1969) bestätigte die Annahme, daß das Ergebnis des Modellversuches auf den Menschen übertragbar ist. Inzwischen liegen die Resultate sechs weiterer Klimakammerversuche zu dieser Frage vor, die in der vorliegenden Arbeit daraufhin untersucht werden sollen, ob sie zu dem gleichen Ergebnis wie der erste führten.

Methodik

Jeder der sieben Versuche - zitierter erster Versuch von Höfler (Höfler, Ladipoh u.Laaser, 1969) mitgerechnet - bestand aus zwei Abschnitten: einem Vortraining auf dem Fahrradergometer bei Zimmertemperatur (18-22°C) und dem Hauptversuch mit der gleichen Arbeitsleistung auf dem Fahrradergometer unter modifizierten Klimakonstellationen.

Klima

Drei Klimakonstellationen wurden gewählt: in drei Versuchen feucht-heißes, in zwei Versuchen mittelfeucht-heißes und in zwei Versuchen trocken-heißes Klima. Die Tabellen 1a und 1b geben die genaueren Daten wieder.

Klima-Konstell.	feucht-heiß			mittelfeucht-heiß		trocken-heiß	
Versuch	L/L	W/W	B/B	F/W	A/S	M/v.A	L/N
TT	36,5°C	36,0°C	36,5°C	44,7°C	41,4°C	44,9°C	44,3°C
FT	31,2°C	31,1°C	32,0°C	27,0°C	28,1°C	26,0°C	25,8°C
Luftf.	69%	70%	76%	25%	39%	22%	23%

Tabelle 1a: Klimadaten der Hauptversuche
Klima-Konstell. = Klima-Konstellation
TT = Trockentemperatur
FT = Feuchttemperatur
Luftf. = Luftfeuchte

Versuch	L/L	A/S	M/v.A
TT	31,5°C	36,0°C	36,0°C
FT	26,5°C	26,1°C	20,2°C
Luftf.	69%	39%	22%

Tabella 1b: Klimadaten während der Nächte der Daueraufenthalt-Versuche
Abkürzungen s. Legende der Tabelle 1a

Versuchspersonen

Bei den Versuchspersonen handelte es sich um 23-27 Jahre alte, weißhäutige, männliche Europäer von, in Bezug auf ihre Körpergröße, normalem Gewicht, die unakklimatisiert waren. Eine Versuchsperson - L/L bzw. L/N - wurde im Verlauf von zwei Jahren dabei zweimal getestet, einmal unter feucht-heißen, das andere Mal unter trocken-heißen Bedingungen. Genaue Angaben finden sich in Tabelle 2.

Versuchsperson	L/L	W/W	B/B	F/W	A/S	M/v.A	L/N
Alter	25 a	25 a	27 a	29 a	27 a	23 a	27 a
Größe	189 cm	176,5 cm	174 cm	180 cm	177 cm	171 cm	189 cm
Gewicht	80 kg	70,5 kg	62,5 kg	83 kg	75 kg	70 kg	84 kg

Tabelle 2: Physische Daten der Versuchspersonen

Vortraining

Die Dauer des Vortrainings auf dem Fahrradergometer betrug 5-11 Tage, wobei an jedem Tag zwei bis vier Einzelarbeiten nach folgendem Schema geleistet wurden: 30-40 min. Ruhe in einem Sessel - 30-50 min. Arbeit auf dem Fahrradergometer - 10-30 min. Ruhe - usw. Die Arbeitsbelastung in den einzelnen Versuchen lag zwischen 7 und 10 mkp/sec. Einzelangaben sind in Tabelle 3 zu finden.

Hauptversuch

Rhythmus und Ausmaß der Arbeitsbelastung waren dieselben wie im Vortraining. Die Dauer der Hauptversuche, von denen drei bei Daueraufenthalt und vier bei intermittierendem Aufenthalt in der Klimakammer durchgeführt wurden, lag zwischen 18 und 35 Tagen. (Über die nächtlichen, klimatischen Verhältnisse der Daueraufenthalte siehe Tabelle 1b). Alle Versuche - Arbeitsleistungen, Messungen - wurden am Tage zwischen 7^{30} Uhr und 17^{00} Uhr gemacht; es wurde keine Jahreszeit bevorzugt.

Versuch	L/L	W/W	B/B	F/W	A/S	M/v.A	L/N
Training							
Tage	10	11	8	10	5	9	8
Arbeit	8 mkp/s	8 mkp/s	7 mkp/s	10 mkp/s	8 mkp/s	10 mkp/s	8 mkp/s
Arbeits-rhythmus	4 x 40 min.	4 x 50 min.	3 x 40 min.	4 x 50 min.	2 x 30 oder 2 x 50 min.	4 x 45 min.	4 x 40 min.
Hauptversuch:							
Tage	35	31	18	25	33	30	26
Arbeit	8 mkp/s	8 mkp/s	7 mkp/s	10 mkp/s	8 mkp/s	10 mkp/s	8 mkp/s
Arbeits-rhythmus	4 x 40 min.	5 x 50 min.	3 x 40 min.	4 x 45 min.	4 x 50 min.	4 x 45 min.	4 x 40 min.
Dauer-aufenthalt	+				+	+	
Intermittierender Aufenthalt		+	+	+			+

Tabelle 3: Dauer, Arbeitsbelastung, Arbeitsrhythmus in Training und Hauptversuch

Berechnungen und Messungen

Die im Zusammenhang dieser Arbeit wichtigen Meßgrößen waren:

Kerntemperatur KT:

Die Kerntemperatur KT wurde rektal vor Beginn der ersten Arbeit sowie sofort nach Abschluß der Einzelarbeiten gemessen.

Schweißmenge S:

Die innerhalb der einzelnen Arbeitsintervalle produzierten Schweißmengen S wurden aus dem Gewichtsverlust durch Wägung kurz vor Beginn und sofort nach Beendigung der Arbeit bestimmt. Nach den einzelnen Wägungen nahmen die Versuchspersonen zwischen 2/3 bis 1/1 der durch

Schwitzen verlorenen Flüssigkeitsmenge in Form von körperwarmem Tee oder zimmerwarmer Coca-Cola zu sich.

Verdunstete Schweißmenge V:

Die verdunstete Schweißmenge V wurde durch eine Schätzung der Wärmebilanz zu bestimmen versucht, wie sie Eichna und Mitarbeiter durchgeführt haben (Eichna und Mitarbeiter, 1950).

Zu dieser Schätzung sind drei Größen erforderlich, die sich aus empirisch gewonnenen Konstanten und Meßdaten errechnen lassen: Umsatz M, Wärmespeicherung ΔH, Konvektions-Strahlungswärmestrom $Q_{c,s}$. Daraus resultiert V nach Eichna (Eichna und Mitarbeiter, 1950):

$V = M \pm Q_{c,s} \pm \Delta H$

Die Umsatzgröße M wurde für einen Teil der Versuche aus Arbeitsumsatz A (25% Wirkungsgrad) und Grundumsatz G (Standard nach Fleisch, Geigy-Tab.1960) geschätzt, nachdem sich in Vorversuchen eine Übereinstimmung mit dem in indirekter Kalorimetrie gemessenen Gesamtumsatz auf 3% genau ergeben hatte; in den anderen Versuchen wurde sie direkt gemessen.

Der Konvektionswärmestrom Q_c berechnet sich nach Clifford und Mitarbeitern (Clifford und Mitarbeiter, 1959) mit dem Koeffizienten K_c = 0,23 x Windgeschwindigkeit ^{0,62} kcal/m^2.h.^{o}C (Windgeschwindigkeit in ft/min).

Bei der Berechnung des Strahlungswärmestromes Q_s wurde davon ausgegangen, daß bei den bestehenden Temperaturdifferenzen zwischen Haut- und Wänden eine annähernd lineare Beziehung angenommen werden darf. Als effektive Strahlungsfläche wurden 80% der geometrischen Körperoberfläche eingesetzt.

Die Wärmespeicherung ΔH wurde aus dem Anstieg der Kerntemperatur berechnet, da die Hauttemperatur nur wenig unter der Kerntemperatur lag (spez. Wärme 0,83 kcal/^{o}C.kg) und sich annähernd parallel zur Körpertemperatur bewegte.

Verdunstungskapazität C:

Für die Berechnung der Verdunstungskapazität C wurden die Angaben Cliffords (Clifford und Mitarbeiter, 1959) mit dem Koeffizienten K_c = o,45 . Windgeschwindigkeit ^{o,63}kcal/m^2.h.Torr (Wind in ft/min) benutzt.

Die Bilanzgrößen ΔH, $Q_{c,s}$, V, die Schweißmenge S und die Verdunstungskapazität C werden im Folgenden für die 1.+2. sowie die 1.+2.+3.+4. Versuchsstunde angegeben. Wo in einem Versuch nur die 1.+2.+3.-Stundenwerte vorlagen, wurde auf den 1.+2.+3.+4.-Stundenwert in einzelnen Fällen extrapoliert; diese Werte sind dann besonders gekennzeichnet (in den Tabellen).

Ergebnisse

Vorbemerkung:

Die in Tabelle 4 angegebenen Daten sind folgendermaßen berechnet worden: Aus den 1.+2.+3.+4.-Stundenwerten von jeweils 3 Tagen - einmal zu Beginn des Hauptversuches (= unakklimatisiert), einmal am Ende des Hauptversuches (= akklimatisiert) - wurde der Mittelwert gebildet und so in die Tabelle eingetragen, daß sich jeweils Wertepaare - unakklimatisiert und akklimatisiert - ergeben; in einigen Fällen war aus experimentellen Gründen nur an einem oder zwei der ersten Tage die Messung möglich, diese Werte sind in Tabelle 4 mit dem Index * gekennzeichnet.

Da eine Fehlerrechnung bei Verwendung von jeweils nur drei Einzelwerten statistisch unzulänglich ist, soll die im Anhang erscheinende Wertetabelle "Einzelergebnisse", die den Mittelwerten zugrunde liegenden Werte wiedergeben, aus denen sich die relative Genauigkeit abschätzen läßt.

Versuch	Kerntemperatur nach 4.Arbeit unakklimatisiert °C	akklimatisiert °C	S_{1-4} unakklimatisiert kcal	akklimatisiert kcal	V_{1-4} unakklimatisiert kcal	akklimatisiert kcal
F/W	39,5*	38,1	2173*	2978	1376*	1547
A/S	39,2	38,1	1599*	1807	1026*	1185*
M/v.A	39,6*	38,3	2066*	2624	1231*	1380
L/N	38,7*	38,1	1913*	1973	1261*	1379
L/L	38,9	37,6	879	1978	657	741
W/W	39,2*	38,0	976	1954	632	739
	nach 3.Arbeit		S_{1-3}		V_{1-3}	
B/B	39,0	38,4	1214	1554	420	455

Tabelle 4: Kerntemperatur nach 4. bzw. 3.Arbeit, Schweißmenge und Verdunstung während 3-4 stündiger Hitzearbeit im unakklimatisierten und akklimatisierten Zustand.

*: Dem "Mittelwert" liegen nur 1 oder 2 Einzelwerte zugrunde.

Die Kerntemperatur KT nach der 4. (3.) Arbeit:
Aus Tabelle 4 geht hervor, daß in allen sieben Versuchen ein deutlicher Unterschied zwischen unakklimatisiertem und akklimatisiertem Zustand der Versuchspersonen besteht. Im akklimatisierten Zustand liegt die Kerntemperatur am Ende der 4. (3.) Arbeit deutlich unter dem entsprechenden Wert des unakklimatisierten; die Differenz beträgt durchschnittlich 1,1°C, ein vom Feuchtigkeitsgrad abhängiger Unterschied im Temperaturverhalten ist nicht zu erkennen.

Die Schweißmenge S_{1-4} (S_{1-3}):
S_{1-4} d.h. Summe der im Verlauf von 4 Arbeiten eines Tages produzierten Schweißmengen; S_{1-3} entsprechend im Verlauf von 3 Arbeiten.
In allen sieben Versuchen ist eine Zunahme der Schweißpro-

duktion im Verlaufe der Akklimatisation festzustellen. Prozentual ausgedrückt liegen die Zuwachsraten zwischen 3 und 56%; bei der geringen Anzahl der Versuche läßt sich nicht sicher entscheiden, ob der Eindruck richtig ist, daß die Zunahme der Schweißproduktion unter feucht-heißen Bedingungen signifikant größer ist als unter mittelfeucht oder trocken-heißen Bedingungen. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß dieselbe Versuchsperson in zwei Versuchen sehr unterschiedliche Schweißproduktionssteigerungen aufweist (s.L/L und L/N). Die Ergebnisse der Versuche L/L und L/N zeigen, daß auch dann ein Akklimatisationserfolg eingetreten sein kann, wenn keine Zunahme von S und V statistisch zu sichern ist. In beiden Fällen sank die Körpertemperatur T mit der Akklimatisation. Im Falle L/N besteht der Akklimatisationserfolg darin, daß bei niedrigerer Körper- und damit Hauttemperatur zumindest gleiche Schweißmengen nach erfolgter Akklimatisation produziert und verdunstet worden sind. Mit anderen Worten: Die Körpertemperatur, bei der der Unakklimatisierte ausreichend schwitzt und verdunstet liegt höher als beim Akklimatisierten.

Die verdunsteten Schweißmengen V_{1-4} (V_{1-3}):
V_{1-4} d.h.: Summe der im Verlauf von 4 Arbeiten eines Tages verdunsteten Schweißmengen; V_{1-3} entsprechend im Verlauf von 3 Arbeiten.
In allen sieben Versuchen steigt V_{1-4} zwischen 8 und 15% an.

Korrelationen

Verhältnis von S_{1-2} zu T_2 und S_{1-4} zu T_4 vor und nach erfolgter Hitzeakklimatisation:
S_{1-2} d.h. Summe der im Verlauf von zwei Arbeiten eines Tages produzierten Schweißmengen.
T_2 d.h. Kerntemperatur am Ende der zweiten Arbeit; T_4 entsprechend am Ende der vierten Arbeit.
Tabelle 5 enthält die Mittelwerte, die der Abbildung 1 zugrunde liegen; wie in Tabelle 4 auch hier die Gegenüber-

stellung: unakklimatisiert - akklimatisiert. T wird in °C, S in kcal. angegeben.

Versuch	unakklimatisiert				akklimatisiert			
	S_{1-2} kcal	KT_2 °C	S_{1-4} kcal	KT_4 °C	S_{1-2} kcal	KT_2 °C	S_{1-4} kcal	KT_4 °C
L/L	518	38,1	879	38,9	1074	37,6	1978	37,6
W/W	364	38,6	976	39,2	1114	38,1	1954	38,0
B/B	809	38,6	1214*	39,0*	1087	38,2	1554*	38,4*
F/W	1128	39,0	2173	39,5	1514	38,0	2978	38,1
A/S	594	39,0	1599	39,2	980	37,9	1807	38,1
M/v.A	964	39,6	2066	39,6	1329	38,2	2624	38,3
L/N	982	38,1	1913	38,7	978	37,6	1973	38,1

Tabelle 5: Mittelwerte der produzierten Schweißmengen während 2-4 stündiger Hitzearbeit aus 3 Tagen des unakklimatisierten und 3 Tagen des akklimatisierten Zustandes, sowie zugehörige Kerntemperaturwerte.
*: kcal/3h bzw. KT_3

In Abbildung 1 sind die Werte der Tabelle 5 in ein Koordinatensystem aufgetragen, wobei die Abszissenwerte den gemittelten Kerntemperaturwerten KT_2 und KT_4 und die Ordinatenwerte den gemittelten S_{1-2} und S_{1-4} entsprechen. Die dem unakklimatisierten Zustand zugehörenden Punkte sind graphisch von denen des akklimatisierten abgehoben. (Kommentar zu Abbildung 1 findet sich im Anschluß an Abbildung 2).

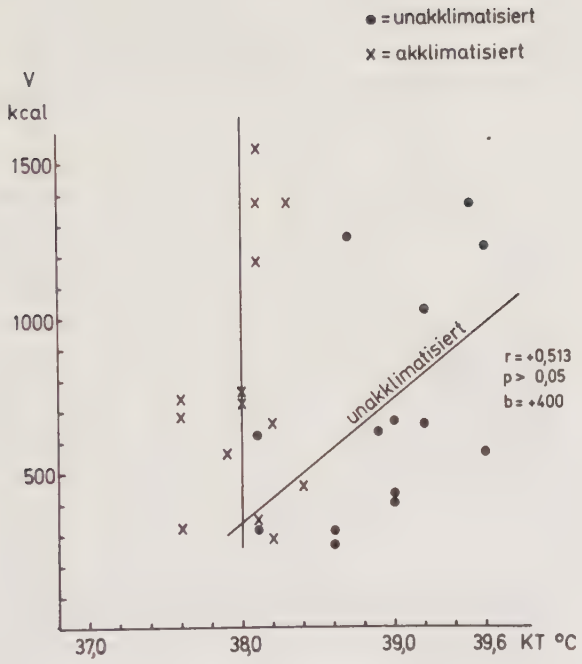

Abb.1: Verhältnis der Schweißproduktion zur Körpertemperatur im akklimatisierten und im unakklimatisierten Zustand

Verhältnis von V_{1-2} zu KT_2 und V_{1-4} zu KT_4 vor und nach erfolgter Hitzeakklimatisation:

V_{1-2} bzw. V_{1-4} d.h. Summe der im Verlauf von zwei bzw. vier Arbeiten eines Tages verdunsteten Schweißmengen.

Tabelle 6 enthält die Mittelwerte, die der Abbildung 2 zugrunde liegen; auch hier die Gegenüberstellung von: akklimatisiert und unakklimatisiert. KT wird in °C, V in kcal. angegeben.

Versuch	unakklimatisiert				akklimatisiert			
	V_{1-2}	KT_2	V_{1-4}	KT_4	V_{1-2}	KT_2	V_{1-4}	KT_4
	kcal	°C	kcal	°C	kcal	°C	kcal	°C
F/W	670	39,0	1376	39,5	758	38,0	1547	38,1
A/S	403	39,0	1026	39,2	563	37,8	1185	37,7
M/v.A	566	39,6	1231	39,6	664	38,2	1380	38,3
L/N	619	38,1	1261	38,7	683	37,6	1379	38,1
L/L	320	38,1	657	38,9	323	37,6	741	37,6
W/W	310	38,6	632	39,2	336	38,1	739	38,0
B/B	268	38,6	420*	39,0*	291	38,2	455*	38,4*

Tabelle 6: Mittelwerte der verdunsteten Schweißmenge während 2-4 stündiger Hitzearbeit aus 3 Tagen des unakklimatisierten und 3 Tagen des akklimatisierten Zustandes, sowie zugehörige Kerntemperaturwerte.
*: kcal/3h bzw. KT_3

Für die Eintragung der Werte in Abbildung 2 gilt dasselbe wie für Abbildung 1 (s. dort). Auch in Abbildung 2 sind die dem unakklimatisierten Zustand zugehörigen Punkte graphisch von denen des akklimatisierten abgehoben.

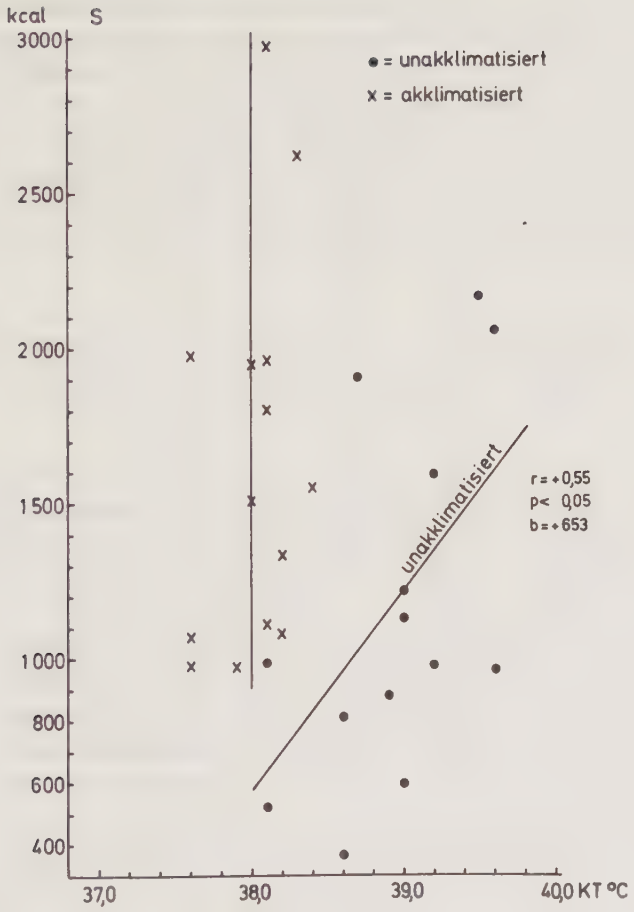

Abb.2: Verhältnis der verdunsteten Schweißmenge zur Körpertemperatur im akklimatisierten und im unakklimatisierten Zustand

Aus Abbildung 1 geht hervor, daß die Versuchspersonen im akklimatisierten Zustand im Vergleich zum unakklimatisierten bei niedrigerer Kerntemperatur größere Schweißmengen produzierten. Dieser Effekt ist so groß, daß selbst die individuellen starken Schwankungen der absoluten Werte der Schweißproduktion - s.Tabelle 5 - die Verteilung der Punkte auf zwei deutlich voneinander abgrenzbare Bereiche des Koordinatensystems nicht verwischen können. Das gleiche gilt für die verdunstete Schweißmenge in den entsprechenden Zeiträumen, wie Abbildung 2 zeigt.

Verhältnis von V_{1-4}/C_{1-4} zu S_{1-4}/C_{1-4} und S_{1-4}/V_{1-4} zu S_{1-4}/C_{1-4} vor und nach erfolgter Akklimatisation:

Tabelle 7 gibt je 1-3 Quotientenwerte für die ersten (1.-4.) und letzten Tage der einzelnen Hauptversuche wieder, die Abbildung 3 zugrunde liegen. Im Gegensatz zu den Werten in den Tabellen 4, 5 und 6, handelt es sich bei den Werten der Tabelle 7 um Einzelwerte. Angestrebt war, die Daten der drei ersten Hauptversuchstage denen der drei letzten gegenüberzustellen, um so einen Vergleich zwischen unakklimatisiertem und akklimatisiertem Zustand der Versuchspersonen anzustellen. Da jedoch ein Teil der Versuchspersonen während der ersten Tage der Hauptversuche unter der zusätzlichen Hitzebelastung keine vier oder auch nur drei Arbeitsperioden zu leisten vermochte, ferner zuweilen experimentelle Schwierigkeiten zu unbrauchbaren Meßwerten führten, konnten nicht für alle Hauptversuche die 4-Stundenwerte der ersten drei Tage zugrunde gelegt werden. Aus den Meßdaten einzelner Versuche ergab sich, daß ein Akklimatisationserfolg schon zwischen dem 4. und 7.Tage zu erkennen war; deshalb ließen sich nur in zwei Fällen die Meßwerte des 4. Hauptversuchstages in die Reihe der Daten des unakklimatisierten Zustandes aufnehmen. Für die Tatsache, daß die in der Tabelle 7 aufgeführten Daten des akklimatisierten Zustandes nicht immer die der letzten drei Tage der Hauptver-

suche sind, sind experimentelle Gründe verantwortlich zu machen, die zu unbrauchbaren oder gar keinen Daten führten. In solchen Fällen wurde der jeweils unmittelbar vor dem ausgefallenen Tag liegende genommen.

	unakklimatisiert				akklimatisiert			
Versuch	Tag	V/C	S/C	S/V	Tag	V/C	S/C	S/V
L/L	1.	0,7	0,9	1,4	32.	1,1	3,1	2,9
	2.	0,7	0,8	1,2	33.	0,9	2,2	2,4
	3.	0,6	0,9	1,5	35.	1,0	2,7	2,7
W/W	2.	0,7	1,2	1,7	27.	0,9	2,4	2,5
	3.	0,7	1,1	1,5	29.	0,9	2,5	2,6
	4.	0,7	1,1	1,5	31.	0,9	2,4	2,7
B/B	1.	0,9	2,2	2,3	15.	1,1	4,3	4,0
	3.	0,9	3,4	3,6	17.	1,1	3,6	3,2
	4.	0,9	2,6	2,7	18.	1,2	3,6	3,1
F/W	3.	0,7	1,2	2,6	20.	1,0	2,1	2,0
					21.	1,2	2,1	1,8
					22.	1,0	1,9	1,9
A/S	2.	0,9	1,4	1,5	27.	1,0	1,4	1,5
	3.	1,0	1,3	1,6	28.	0,9	1,4	1,5
					29.	1,1	2,8	2,4
M/v.A	3.	0,7	1,2	1,7	28.	0,8	1,7	2,1
					29.	0,8	1,5	1,9
					30.	0,8	1,5	1,8
L/N	3.	0,7	1,0	1,5	23.	0,7	1,1	1,4
					24.	0,7	1,1	1,5
					25.	0,8	1,1	1,4

Tabelle 7: Quotientenwerte, die der Abbildung 3 zugrunde liegen

In Abbildung 3 sind die Werte der Tabelle 7 zu einem Schaubild vereinigt.

Wie in Abbildung 1 und 2 wurden auch hier die dem unakklimatisierten Zustand entsprechenden Punkte von denen des akklimatisierten zeichnerisch unterschieden.

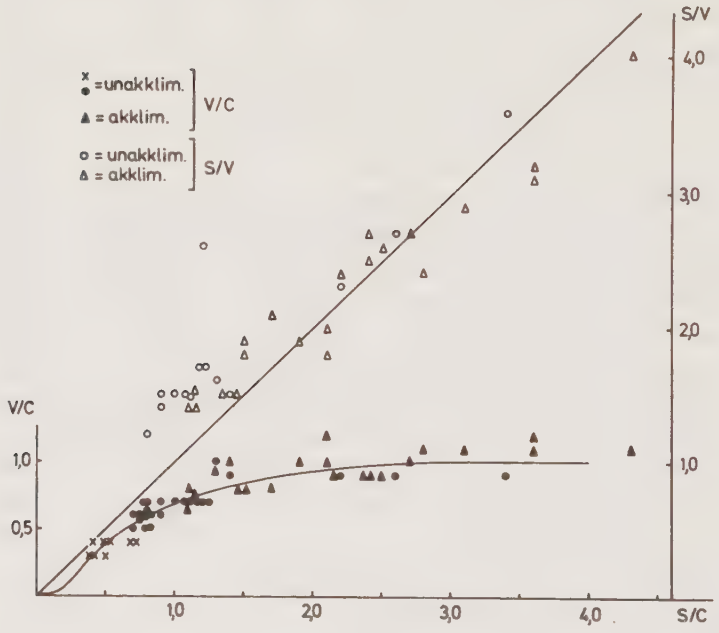

Abb.3: Beziehung zwischen Verdunstungskapazität C, Schweißmenge S und Verdunstung V.
(Die mit x markierten Punkte sind aus neueren, in dieser Arbeit noch nicht weiter berücksichtigten Experimenten gewonnen.)

Zum Verständnis der Kurven in Abbildung 3:

Abbildung 3 gibt die Beziehungen zwischen Verdunstungskapazität C, Schweißmenge S und Verdunstung V wieder. Liegen die V/C-Werte auf der Geraden, so ist V=S. Liegen die S/V-Werte auf der Geraden, dann ist V=C. Erst bei V/C=1,o ist die Haut vollständig befeuchtet.

Die Punkte mit den Wertepaaren S/C und S/V liegen im Bereich einer - nicht eigens eingezeichneten - Kurve, die ihren Ursprung in S/V=1,o und S/C=o,o hat; das heißt, wird nur sehr wenig Schweiß produziert, so verdunstet er vollständig, also S=V und S/V=1,o wobei S/C nahe bei o,o liegt.

Die von der Geraden S=V und der Kurve V/C = f (S/C) begrenzte Fläche stellt die Menge des abgetropften Schweißes dar.

Die für die Diskussion wichtigen Aussagen beider Kurven:

Obere Kurve:

1. Alle Versuchspersonen produzierten unakklimatisiert bereits mehr Schweiß, als sie im entsprechenden Zeitraum verdunsteten; alle $S/_V$-Werte des unakklimatisierten Zustandes sind bereits größer als 1,o.

2. Nach erfolgter Akklimatisation wird der Unterschied zwischen produzierter Schweißmenge S und zugehöriger verdunsteter Schweißmenge V bei den meisten Versuchspersonen größer. Das Ausmaß dieses Unterschiedes schwankt zwischen o,o und ca. 2,5 Einheiten der Ordinate $S/_V$.

Untere Kurve:

3. $V/_C$
   Von den 14 Einzelwerten des unakklimatisierten Zustandes lagen für $V/_C$ 8 Werte bei o,7, je 1 Wert bei o,6 und 1,o sowie 4 Werte bei o,9.
   Daraus ergibt sich ein Mittelwert von: $\overline{V/_C}$ = o,77
   Für den akklimatisierten Zustand finden sich von 20 Einzelwerten 4 Werte bei 1,o - dem theoretischen Maximalwert -, 4 Werte bei o,8, 5 Werte bei o,9,

3 Werte bei 1,1, 2 Werte bei 1,2, 2 Werte bei o,7. Daraus ergibt sich ein Mittelwert von: $\overline{V/C}$ = o,94
Ließe man von den 7 Versuchen die entsprechenden Werte der beiden Versuche L/N und M/v.A, die in trocken-heißem Klima stattfanden, außer Betracht, so ergäben sich für die 5 restlichen Versuche folgende Mittelwerte:
unakklimatisiert: $\overline{V/C}$ = o,78
akklimatisiert: $\overline{V/C}$ = 1,o1
Wie aus den Werten der Versuche L/N und M/v.A in Tabelle 7 ersichtlich ist, läßt sich ein solches "selektives" Auswerten der Versuchsergebnisse damit begründen, daß im trockenheißen Klima eine absolute Zunahme der Schweißmenge und der Verdunstung nicht eintreten muß (wohl aber eine Änderung ihrer Temperaturabhängigkeit: Abb.1, 2).

4. S/C
Von den 14 Einzelwerten des unakklimatisierten Zustandes lagen für S/C 11 Werte unter 2,o, 3 Werte über 2,o. Alle 3 Werte, die über 2,o liegen, gehören zu Versuch B/B. Von den 20 S/C-Werten des akklimatisierten Zustandes sind 9 kleiner als 2,o und 11 größer als 2,o. Läßt man auch hier wie unter 3. die Versuche L/N und M/v.A fort, so sind von den restlichen 12 S/C-Werten des unakklimatisierten Zustandes 9 Werte kleiner als 2,o und 3 Werte größer als 2,o; von den restlichen 14 S/C-Werten des akklimatisierten Zustandes sind dann nur noch 3 Werte kleiner als 2,o, dagegen 11 größer als 2,o.
Nach erreichter Akklimatisation erst produzierten also die meisten Versuchspersonen mehr als doppelt soviel Schweiß, wie sie maximal verdunsten konnten.

5. V/C ist eine Funktion von S/C, die sich mit der Gleichung $V/C = 1{,}26 \cdot e^{\frac{-0{,}6}{S/C}}$ beschreiben läßt. Diese Kurve ist für das V/C-Intervall zwischen o,4 und 1,o belegt ($r = -\,o{,}902$, $b = -\,o{,}258$, $p \ll o{,}oo1$).
Die Abweichung der Kurve im Bereich niedriger S/C-

Werte ($<$o,3) von der Geraden in Abb.3 besagt, daß bei kleinen S/C-Werten der produzierte Schweiß noch nicht vollständig verdunstet. Dieses Ergebnis erscheint insofern plausibel, als bei ganz trockener Haut die schlechte Benetzbarkeit dazu führt, daß die ersten Schweißtropfen abperlen, ohne zur Benetzung und damit Verdunstung beizutragen. In dieser Hinsicht unterscheidet sich die Haut von den Modellzylindern KERSLAKE'S mit konstanter Benetzbarkeit.
Im Kurvenbereich zwischen o,3 und o,5 für S/C steigt V annähernd proportional zu S, was auf die allmählich erreichte vollständige Hautdurchfeuchtung zurückzuführen ist, durch die nun eine optimale Benetzbarkeit gewährleistet ist. Wird soviel Schweiß produziert, daß S/C $>$ 2,o ist, so tropft wiederum unverdunsteter Schweiß ab, weil die Verdunstungskapazität dann erreicht ist.

Zusammenfassung der für die Diskussion wesentlichen Ergebnisse der 7 Klimakammerversuche:

1. Nach erreichter Hitzeakklimatisation liegt die Kerntemperatur der Versuchspersonen nach Arbeitsleistung auf dem Fahrradergometer deutlich unter den entsprechenden Werten des unakklimatisierten Zustandes (s.Tabelle 4), (ca. 1,1°C).
2. Die hitzeakklimatisierten Versuchspersonen steigerten im Laufe der Akklimatisation in 6 von 7 Fällen ihre Schweißproduktion deutlich (s.Tabelle 4).
3. Wie Abbildung 1 zeigt, produziert der Hitzeakklimatisierte bei niedrigerer Kerntemperatur größere Schweißmengen als der Unakklimatisierte.
4. Auch die verdunstete Schweißmenge nimmt im Laufe der Hitzeakklimatisation zu (s.Tabelle 4).
5. Die bei 6 von 7 Versuchspersonen im unakklimatisierten Zustand produzierten Schweißmengen liegen

im Verhältnis zur entsprechenden Verdunstungskapazität deutlich unter 2,o; nur in den Versuchen mit feucht-heißem Klima wird dieser Wert nach erreichter Akklimatisation größer als 2,o (s.Tabelle 7).

6. In 4 von 7 Versuchen läßt sich die Bewegung des $V/_C$-Wertes zum theoretischen Maximalwert von 1,o hin feststellen; darunter sind alle 3 in feucht-heißem Klima durchgeführten Versuche (s.Tabelle 7).

7. Mit einer Ausnahme - Versuch A/S - war, wenn der $V/_C$-Wert bei 1,o lag, der entsprechende $S/_C$-Wert 2,o oder größer (s.Tabelle 7).

8. V/C ist eine Funktion von S/C, die sich für den Bereich $S/C > o,4$ mit der Gleichung

$$V/C = 1,26 \cdot e^{\frac{-o,6}{S/C}}$$

beschreiben läßt.

Diskussion

Einschränkungen:

1. Jedes Einzelergebnis, das auf dem Umweg der Wärmebilanzrechnung gewonnen wurde, - V und Quotienten, in die V einging - ist mit einer besonders großen Unsicherheit belastet, die exakt zu bestimmen, schwer ist.

2. Die geringe Zahl der Einzelversuche - 7 insgesamt, die sich noch unter 3 verschiedene Klimabedingungen aufteilen - läßt keine umfassende statistische Sicherung der Ergebnisse zu.

Die hier angeführten 7 Hitzeakklimatisationsversuche bestätigen die Ergebnisse anderer Autoren (Höfler, 1966; Schmoll, 1966), was den Abfall der Kerntemperatur angeht. Der Sinn dieser Veränderung wird darin gesehen, daß dadurch der Sicherheitsabstand der Kerntemperatur vom oberen kritischen Temperaturbereich vergrößert wird (Höfler u.Mitarb., 1969).

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, ist unter Hitzebedingungen nur über die Schweißverdunstung eine Wärmeabgabe des Körpers an die Umgebung möglich. Ein Liter verdunsteten Schweißes bei 30°C entspricht dabei der Wärmemenge von 579 kcal. Wie beträchtlich diese Menge ist, unterstreicht Höfler, wenn er schreibt, daß "durch Verdunstung von 100 ml Schweiß die Grundumsatzwärme von 1 Stunde gebunden werden (kann)" (Höfler, 1968).

Auch die Tatsache, daß in allen diesen Versuchen die Versuchspersonen im akklimatisierten Zustand bei niedrigerer Kerntemperatur mehr Schweiß produzierten, bestätigt ein schon von Wyndham (Wyndham, 1967) herausgestelltes Phänomen der Hitzeakklimatisation. Daß die Schweißdrüsen schon bei niedrigerer Kerntemperatur mit einer verstärkten Schweißproduktion einsetzen und viel langsamer als im unakklimatisierten Zustand ermüden (Wyndham u. Mitarbeiter, 1966), erscheint sehr sinnvoll, da ja:

1. unter Hitzebedingungen nur die gesteigerte Schweißproduktion zu einer verstärkten Wärmeabgabe (Verdunstung) führen kann und
2. die erniedrigte Kerntemperatur das natürliche Wärmegefälle zwischen Körper und Umwelt zugunsten der Vergrößerung des Sicherheitsabstandes der Kerntemperatur zum kritischen oberen Temperaturbereich auf Kosten der Wärmeabgabemöglichkeiten des Körpers verringert; der Wärmeabstrom eines z.B. 38,0°C warmen Körpers bei 32,0°C Umgebungstemperatur ist geringer als bei einem 39,0°C-warmen Körper.

Dem von den Schweißdrüsen produzierten Schweiß stehen grundsätzlich zwei Wege offen, die Körperoberfläche zu verlassen. Er kann verdunsten oder aber abtropfen. Zunächst scheint nur der erste Weg physiologisch sinnvoll zu sein, er führt zu der erstrebten Wärmeabgabe. Nun ist aber, wie eingangs bereits erwähnt, schon lange bekannt (Lehmann, 1965), daß im feucht-heißen Klima schon der Unakklimatisierte mehr schwitzt, als er im entsprechenden Zeitraum

verdunsten kann. Welchen Sinn hat nun diese Überschußproduktion, die im Laufe der Akklimatisation noch größer wird?

Bei allen Vorbehalten gegenüber der statistischen Sicherheit der genaueren Zahlenwerte der in dieser Arbeit wiedergegebenen Klimakammerversuchsergebnisse, sprechen diese wohl doch für die von Höfler gemachte Annahme (Höfler und Mitarbeiter, 1969), daß erst bei einer Überschußproduktion von Schweiß, die zwangslaufig auch zu eigentlich unerwünschtem Abtropfen führt, die Körperoberfläche maximal befeuchtet ist und damit maximal verdunsten kann. Erst wenn ein geschlossener Wasserfilm die gesamte Körperoberfläche überzieht, ist mit maximaler Verdunstung zu rechnen. Daß Schweiß bereits vor Erreichen dieses "Idealzustandes" abzutropfen beginnt, ist eine zwar unökonomische, aber von den anatomischen Gegebenheiten des Körpers her - schlechte Benetzbarkeit, ungleichmäßige Schweißdrüsendichte, überwiegend senkrecht stehende Flächen - unumgängliche Tatsache, die Kerslake (Kerslake, 1963) auch in seinem Zylindermodellversuch beobachtete: von den Zyliniern begann bereits dann unverdunstetes Wasser abzutropfen, wenn das Verhältnis zwischen aufgetragener Wassermenge S und maximal möglicher Verdunstung C > o,4 war.

Interessanterweise zeigte sich in der überwiegenden Zahl der in dieser Arbeit untersuchten Werte, daß, wie im Kerslake'schen Modellversuch, erst dann die maximale Verdunstung erreicht wurde, wenn $S/_C$ 2,o oder größer war; erst dann war die Haut der Versuchspersonen vollständig benetzt.

Zumindest was die Ergebnisse der Versuche in feucht-heißem Klima angeht, läßt sich sagen, daß die Zunahme der Schweißproduktion im Laufe der Akklimatisation ein physiologisch sinnvoller Vorgang ist, durch den erst maximale Verdunstung und damit maximale Wärmeabgabe möglich ist. Dieser Zustand scheint erst dann erreicht zu sein, wenn mindestens zweimal soviel Schweiß produziert wird, wie gleichzeitig maximal verdunstet werden kann. Für die Akklimatisation im trocken-heißen Klima scheint die aus Abb.1 und 2 erkennbare

Linksverschiebung, d.h. die Erniedrigung der Kerntemperatur, ohne daß dadurch die Schweißproduktion absinkt, ausreichenden Schutz vor Wärmestauungen zu gewährleisten.

Kurze Zusammenfassung

In Klimakammerversuchen wurde mit unterschiedlichen Klima-Konstellationen bei sieben Versuchspersonen die Beziehung zwischen Schweißmenge und Verdunstung bei Hitzearbeit verschiedener Schweregrade untersucht. Es zeigte sich, daß zwischen beiden Größen eine statistisch gesicherte Relation besteht, die sich mit der Funktion

$$V/_C = 1{,}26 \cdot e^{\frac{-0{,}6}{S/C}}$$

beschreiben läßt.

Literaturverzeichnis
==========

1. CLIFFORD,I., KERSLAKE,D.Mck. and WADELL,I.L.: The Effects of Wind Speed on Maximum Evaporation Capacity in Man. J.Physiol. London, 147, 253 (1959)

2. EICHNA,L.W., CH.R.PARK, N.NELSON, S.M.HORVARTH and E.D. PALMES: Thermal regulation during acclimatization in a hot, dry (desert-type) environment. Amer.J.Physiol.163, 585 (1950)

3. HÖFLER,W. Changes in the regional distribution of sweating during acclimatization to heat. J.Appl.Physiol. (1968)

4. HÖFLER,W. Hitzeakklimatisation. Hippokrates 14, 517-524 (1968)

5. HÖFLER,W. Verhalten der Schweißsekretion bei der Akklimatisation in einem natürlichen tropischen Klima. Int.Z.angew.Physiol. einschl. Arbeitsphysiol.22, 317-326 (1966)

6. HÖFLER,W., J.LADIPOH, U.LAASER: Beziehung zwischen Schweißmenge, Verdunstung und Körpertemperatur bei der Akklimatisation in künstlichem feucht-heißem Klima. Int.Z.angew.Physiol. einschl.Arbeitsphysiol.27, 34-42 (1969)

7. KERSLAKE,M.Meck. Errors Arising from the Use of Mean Heat Exchange Coefficients in the Calculation of the Heat Exchange of a Cylindrial Body in Transverse Wind. In: Temp.Meas.Contr.Sc.Ind. New York, Reinhold (1963)

8. LEHMANN,G. Die Arbeitsfähigkeit des Menschen im tropischen Klima. Heft Nr.144, Köln-Opladen (1965)

9. SCHMOLL,D. Phasen der Akklimatisation an Hitzearbeit während eines dreiwöchigen Daueraufenthaltes in einem feucht-heißen Klima. Dissertation, Tübingen 1966

10. WYNDHAM,C.H. Effect of acclimatization on the sweat rate/rectal temparatur relationship. J.Appl.Physiol.22, 27 (1967)

11. WYNDHAM,C.H., N.B.STRYDOM, J.F.MORRISION, C.G.WILLIAMS, G.A.G.BREDELL and J.PETER:
Fatigue of the sweat gland response.
J.Appl.Physiol.21, 107 (1966)

Anhang

Versuch	Kerntemperatur nach 4.Arbeit		S_{1-4}		V_{1-4}	
	unakklimatisiert	akklimatisiert	unakklimatisiert	akklimatisiert	unakklimatisiert	akklimatisiert
	°C	°C	kcal	kcal	kcal	kcal
L/L	39,3	37,8	895	2118	656	738
	38,9	37,7	776	1757	654	736
	38,6	37,4	966	2058	661	751
W/W	-	37,9	1040	1875	605*	739
	39,3	38,1	930	1973	637	746
	39,1	38,1	959	2016	653	733
	nach 3.Arbeit		S_{1-3}		V_{1-3}	
B/B	38,8	38,8	1030	1740	440	437
	39,2	38,3	1480	1495	407	464
	39,0	38,2	1133	1427	412	465
	nach 4.Arbeit		S_{1-4}		V_{1-4}	
F/W	-	37,7	-	3203	-	1567
	-	38,2	-	2796	-	1529
	39,5	38,3	2173	2934	1376	1545
A/S	39,7	37,7	-	1726	-	1150
	39,0	37,6	1469	1817	957	1219
	39,0	38,9	1729	1876	1096	-
M/v.A	-	38,4	-	2783	-	1359
	-	38,3	-	2654	-	1397
	39,6	38,1	2066	2434	1231	1384
L/N	-	37,9	-	1959	-	1379
	38,8	38,3	1827	2001	1231	1349
	38,6	38,0	1998	1958	1290*	1410

Tabelle "Einzelergebnisse", die den Mittelwerten der Tabelle 4 zugrunde liegen

Herrn Professor Dr. W.Höfler möchte ich sehr dafür danken, daß er mir das Thema zu dieser Arbeit gegeben hat und mich bei deren Ausführung in so freundlicher und hilfsbereiter Art unterstützt hat.

Dem Direktor des Tropenmedizinischen Instituts der Universität Tübingen, Herrn Professor Dr. H.J.Knüttgen danke ich für die Möglichkeit, in seinem Institut arbeiten gedurft zu haben.

Für die Hilfe bei der Zusammenstellung der Tabellen und die Anfertigung der Photographien zu den Abbildungen möchte ich mich bei Fräulein I.Hermann herzlich bedanken; bei meiner "Ur"-Tante Max für die große Geduld, mit der sie meine erste Reinschrift nach meinem ziemlich unorthodoxen Diktatstil anfertigte.

Lebenslauf

Am 12.November 1942 wurde ich, Georg Balg, in Köln geboren.

Ich besuchte folgende Schulen:

vom 1.4.1948 - 31.3.1952
die Volksschule in Köln-Riehl

vom 1.4.1952 - 31.3.1954
das Gymnasium der Benedektiner-Abtei in Kornelimünster

vom 1.4.1954 - 31.3.1962
das Emil-Fischer-Gymnasium in Euskirchen, wo ich auch mein Abitur machte.

Vom 1.4.1962 - 31.3.1963 leistete ich meinen Grundwehrdienst. Am 1.4.1963 immatrikulierte ich mich als Student des Leibniz-Kollegs der Universität Tübingen. Seit dem Wintersemester 1963 studiere ich - mit Ausnahme des Wintersemesters 1967/68, das ich in Wien verbrachte - in Tübingen Medizin.

Im Sommersemester 1970 bestand ich in Tübingen das medizinische Staatsexamen.